

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.4
第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态 于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)

西安市PM_{2.5}中碳质气溶胶污染特征 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)

太原市冬季PM_{2.5}化学组分特征与来源解析 刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)

郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析 闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)

珠海市郊区大气PM_{2.5}中元素特征及重金属健康风险评价 杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)

一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响 金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉(1562)

基于SOA转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟 高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)

京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析 孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)

2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算 赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)

基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性 齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)

四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)

餐饮源挥发性有机物组成及排放特征 高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)

广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程PAN和O₃分析 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰(1634)

北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化 胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)

南昌市扬尘PM_{2.5}中多环芳烃的来源解析及健康风险评价 于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)

道路扬尘排放因子建立方法与应用 樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)

现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析 马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)

雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性 杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)

霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估 赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)

支持向量机回归在臭氧预报中的应用 苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)

基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的PHEV二氧化碳排放分析 郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)

岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应:以重庆龙凤槽谷地下河系统为例 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)

胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险 刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)

湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估 彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)

生态净化系统中DOM光学特性及影响因素分析:以盐龙湖春季为例 马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)

溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系:基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC) 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)

汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)

基于RZWQM模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律 郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)

澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素a的空间分布特征 程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏(1779)

福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征 何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)

尾水受纳河流中PhACs在传统水相中的分布及环境风险 王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)

绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价 李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 刚佳宇, 邓金玲(1803)

超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味 孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)

金属有机框架MIL-53(Fe)可见光催化还原水中U(VI) 闫增元, 刁海玲, 袁立永(1819)

覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异 龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)

气氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能 许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)

改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果 陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 刘彦廷, 王洪涛, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)

纳米磁性磷酸二氢钙对Cd的吸附、回收与再生 李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)

赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制 黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)

微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性 马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)

生活污水预沉淀-SNAD颗粒污泥工艺小试 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 张志诚, 张杰(1871)

生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚(1878)

硫磺/硫酸铁自养反硝化系统脱氮性能 周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)

异养硝化细菌Pseudomonas putida YH的脱氮特性及降解动力学 汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 郇丹(1892)

污泥龄及pH值对反硝化除磷工艺效能的影响 韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)

盐度条件下ANAMMOX-EGSB反应器颗粒污泥微生物群落 王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)

内源磷PHA的贮存对混合菌群耐低温特性的影响 杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)

中国市政污泥中磷的含量与形态分布 王超, 刘清伟, 职音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)

广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价 王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)

长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N₂O)浓度特征及影响因素 田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)

内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤CH₄吸收规律 杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)

水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应 王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)

土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响 徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)

黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素 覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)

农用地土壤抗生素组成特征与积累规律 孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)

生物发酵制药VOCs与臭味治理技术研究与发展 王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明晗, 杨敏(1990)

《环境科学》征订启事(1612) 《环境科学》征稿简则(1787) 信息(1663, 1796, 1833)

盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落

王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳*

(重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要: 采用高通量测序技术探究了 0、15 和 30 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐度条件下稳定运行 ANAMMOX-EGSB 反应器中颗粒污泥的微生物群落变化。结果发现, 进水盐度提升至 15 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 及 30 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 后, 反应器脱氮性能呈现小幅下降, 随运行时间延长脱氮性能均可恢复。反应器性能稳定后, 3 种盐度条件下厌氧氨氧化菌的丰度依次为 10.33%、20.90% 和 35.87%, 其中 *Candidatus Kuenenia* 属为优势属。浮霉状菌门、变形菌门、绿弯菌门丰度占总体比例较高且累计丰度超过了 80%, 为反应器的优势菌门。盐度条件下, 浮霉状菌门丰度增加, 变形菌门丰度降低, 绿弯菌门丰度相对稳定。电镜扫描显示盐度条件下颗粒污泥表面有大量丝状菌和胞外聚合物。盐度条件下反硝化菌丰度提高, 增强了反硝化协同脱氮, 绿弯菌门和拟杆菌门微生物丰度的提高有利于维持颗粒污泥结构稳定, 好氧微生物及反硝化菌的存在也有利于维持反应器内部厌氧水平。这些结果表明, 厌氧氨氧化菌经驯化可适应盐度, 盐度条件下伴生菌对厌氧氨氧化菌功能的发挥提供了支撑。

关键词: 厌氧氨氧化 (ANAMMOX); 颗粒污泥; 伴生菌; 盐度; 高通量测序

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1906-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809072

Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions

WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, GUO Jin-song, YAN Pen, FANG Fang*

(School of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: High-throughput sequencing technology was used to investigate changes in the microbial community in granular sludge under salinity conditions of 0, 15, and 30 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ in an ANAMMOX-EGSB reactor under stable operation. The study found that when the influent salinity was increased to 15 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and 30 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, the nitrogen removal performance of the reactor decreased slightly, but was restored with the extension of the running time. After the performance of the reactor became stable, the abundance of the ANAMMOX bacteria under the three salinity conditions was 10.33%, 20.90%, and 35.87%, of which *Candidatus Kuenenia* was the dominant genus. Planctomycetes, Proteobacteria, and Chloroflexi accounted for a high proportion in the granular sludge, and their cumulative abundance exceeded 80%, making them the dominant phyla of the reactor. Under saline conditions, the abundance of the Planctomycetes bacteria increased, the abundance of the Proteobacteria bacteria decreased, and the abundance of the Chloroflexi bacteria was relatively stable. Electron microscopy showed a large number of filamentous bacteria and extracellular polymers were present on the surface of the granular sludge under saline conditions. The increased abundance of the denitrifying bacteria enhanced the cooperative denitrification, the presence of aerobic microorganisms and denitrifying bacteria facilitated the maintenance of anaerobic conditions inside the reactor, and the increased abundance of Chloroflexi and Bacteroidetes was beneficial to maintain the stability of the granular sludge structure. These results showed that the ANAMMOX bacteria could be adapted to saline conditions by acclimation, and that the associated bacteria provided support for the function of the ANAMMOX bacteria under saline conditions.

Key words: anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX); granular sludge; associated bacteria; salinity; high-throughput sequencing

厌氧氨氧化工艺因其高效、低能耗的优势, 在废水生物脱氮领域具有广阔的应用前景。厌氧氨氧化微生物聚集体是厌氧氨氧化菌和伴生菌的集合体, 解析聚集体的微生物群落结构特征对分析厌氧氨氧化反应器的脱氮性能至关重要。

目前已有一些厌氧氨氧化反应器微生物群落结构研究的报道。汪瑶琪等^[1]研究了厌氧氨氧化反应器启动过程中微生物群落结构特征, 分析了厌氧氨氧化菌的变化规律。Costa 等^[2]研究了接种物和操作条件对厌氧氨氧化反应器运行的影响, 分析了微生物群落结构的差异。曹雁等^[3]和陈重军等^[4]研究了上流式厌氧过滤床、厌氧折流板厌氧氨氧化反应

器中微生物群落结构特征。Pereira 等^[5]、Isanta^[6]等和 Leal 等^[7]分别研究了苯酚、温度和 C/N 对厌氧氨氧化反应器脱氮性能的影响以及不同情况下微生物群落结构的差异。Yang 等^[8]研究了底物抑制条件下厌氧氨氧化反应器性能和微生物群落结构的关系。这些研究为厌氧氨氧化反应器运行和应用提供了支撑, 但多关注于厌氧氨氧化菌与脱氮性能的关系, 而对于伴生细菌中与氮转化相关的或起支撑

收稿日期: 2018-09-13; 修订日期: 2018-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51878091, 21876016)

作者简介: 王晗 (1986~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境微生物, E-mail: wanghan2202@163.com

* 通信作者, E-mail: fangfangcq@cqu.edu.cn

作用的功能微生物关注甚少,如参与协同脱氮的反硝化微生物、参与有机物质降解的异养微生物等。

厌氧氨氧化工艺应用于工业废水处理是研究的热点,含盐废水是一种常见工业废水,盐度造成的高渗环境会造成多种影响。目前已有一些从微生物群落角度分析盐度对厌氧氨氧化工艺影响的研究。Kartal 等^[9]研究了淡水厌氧氨氧化富集培养物经海水驯化后种属的变化。Yang 等^[10]研究了常温下处理高盐度废水厌氧氨氧化反应器的脱氮性能,指出优势厌氧氨氧化菌种属为 *Candidatus Kuenenia* 属。Gonzalez-Silva 等^[11]研究了厌氧氨氧化颗粒污泥适应盐度过程中微生物群落结构的变化规律。Wei 等^[12]研究了厌氧氨氧化反应器处理不同浓度海水时的脱氮性能,分析了厌氧氨氧化菌的丰度变化及演替规律。盐度对厌氧氨氧化菌和伴生菌均会造成影响,这些研究多关注了盐度条件下的微生物群落结构及厌氧氨氧化菌的变化,并未探讨盐度条件下伴生菌的变化及其对系统稳定性的作用。

因此本文对盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器脱氮性能和颗粒污泥微生物群落结构进行了分析,探讨了盐度对厌氧氨氧化菌及伴生菌的影响,并分析了伴生菌对反应器稳定性的作用。

1 材料与方法

1.1 反应器运行

1.1.1 反应器设置

采用 EGSB 反应器实现厌氧氨氧化工艺。反应器由有机玻璃制成,高 1 000 mm,内径 50 mm,总有效容积 1.86 L,其中反应区容积 1.5 L,沉淀区容积 0.35 L。反应器外设水浴保温层,并缠绕铝箔胶带以避光。反应器进水和回流由蠕动泵从反应器底部泵入。

1.1.2 试验原水和接种污泥

采用人工合成的无外加 COD 的含氮废水,其中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 由 NH_4Cl 和 NaNO_2 按量比 1:1 添加,浓度约为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。按照 HCO_3^- 与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 摩尔比为 2:1 添加 KHCO_3 ,用以维持 pH 值为 7.8 ~ 8.0。其他主要成分包括 KH_2PO_4 $0.025 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以及微量元素液 I、II 各 $1.25 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[13]。所需药品 NH_4Cl 、 NaNO_2 、 KHCO_3 、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 KH_2PO_4 为工业纯,配制微量元素液所需药品为分析纯。在废水中按需求添加氯化钠,配制成含盐废水。

从实验室现有 3 个 ANAMMOX-EGSB 反应器(其中 1 个反应器曾在盐度条件下运行)各取适量

颗粒污泥混合后接种于图 1 所示的反应器。反应器在氮容积负荷 $2.58 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 条件下运行,MLSS 和 MLVSS 分别为 $68.05 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $21.80 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

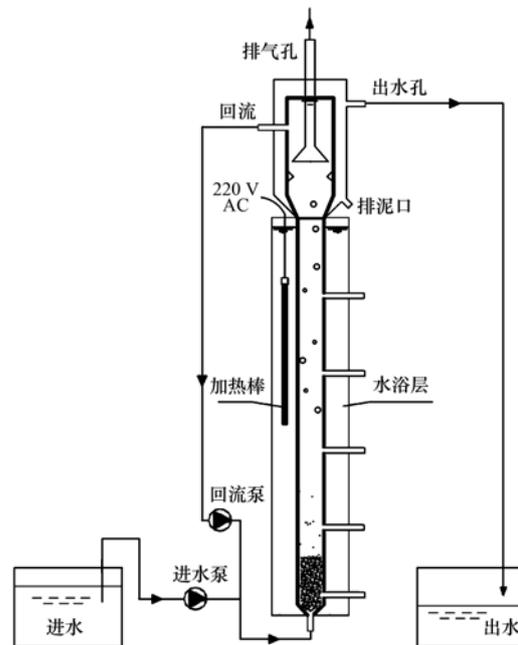


图 1 ANAMMOX-EGSB 反应器示意

Fig. 1 Diagram of the ANAMMOX-EGSB reactor

1.1.3 运行工况与实验方案

反应器回流比设置为 25:1,上升流速为 $4.42 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$,HRT 为 3.72 h,水浴层温度由加热棒控制在 $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。经过一段时间的运行,当反应器氨氮和亚硝氮去除率大于 90% 时,认为反应器运行稳定。向合成废水中添加氯化钠,并以 $15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 为梯度分两次提升反应器进水盐度至 $15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.2 测试方法

1.2.1 水质检测

每两天取反应器进出水,用 $0.22 \mu\text{m}$ 针式滤器过滤后测定 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度。 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 采用水杨酸-次氯酸盐分光光度法测定, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法测定, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 采用紫外分光光度法测定^[14]。TN 浓度即为 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度相加。

1.2.2 颗粒污泥表面形貌测定

不同盐度下反应器稳定运行后,取颗粒污泥样品用戊二醛(2.5%)固定,冷冻干燥并喷金后,应用 FEI Nova400 场发射扫描电子显微镜观察表面形貌。

1.2.3 高通量测序

不同盐度下反应器稳定运行后,从反应器底部

取颗粒污泥样品 0.3 g, 委托上海美吉生物医药科技有限公司进行污泥总 DNA 的提取, 采用细菌 16S rRNA 基因的 V3-V4 区通用引物 338F/806R (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3'/5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3') 对提取的总 DNA 进行 PCR 扩增、建库, 于 Illumina MiSeq PE 300 高通量测序平台进

行高通量测序, 每个样品进行了 3 次生物学重复.

2 结果与分析

2.1 反应器运行性能

不同盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器进出水质和稳定阶段进出水质分别如图 2 和表 1 所示.

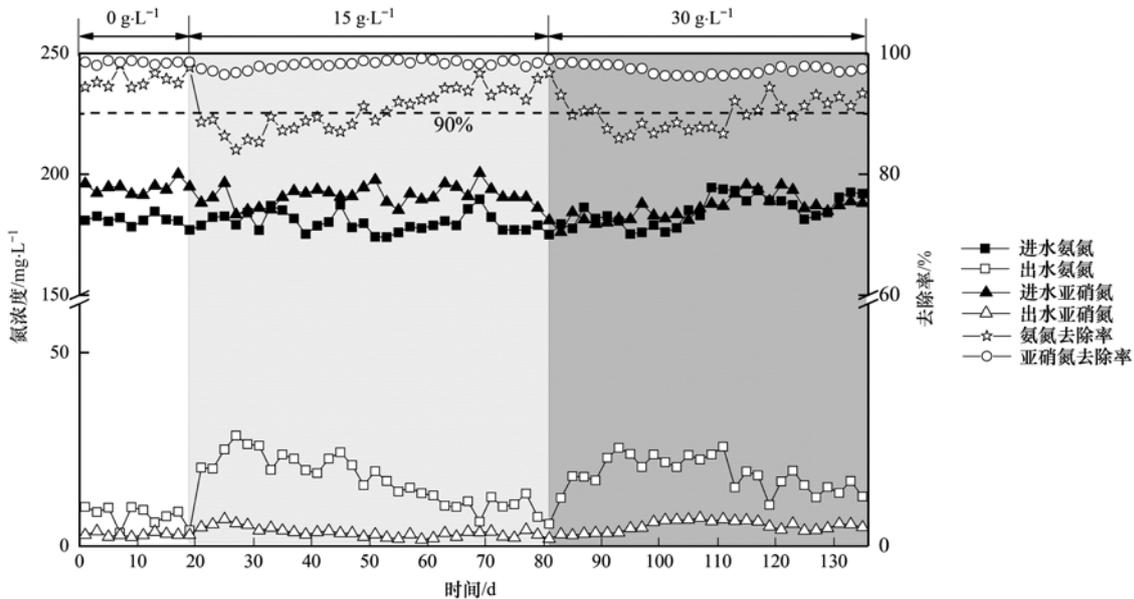


图 2 ANAMMOX-EGSB 反应器进出水质

Fig. 2 Inlet and outlet water quality of the ANAMMOX-EGSB reactor

表 1 ANAMMOX-EGSB 反应器稳定阶段进出水质

Table 1 Inlet and outlet water quality of the ANAMMOX-EGSB reactor at the stable stage

盐度 /g·L ⁻¹	稳定阶段 /d	进水氨氮 /mg·L ⁻¹	出水氨氮 /mg·L ⁻¹	氨氮 去除率/%	进水亚硝氮 /mg·L ⁻¹	出水亚硝氮 /mg·L ⁻¹	亚硝氮 去除率/%	进水硝氮 /mg·L ⁻¹	出水硝氮 /mg·L ⁻¹	硝氮去除率 ¹⁾ /%	总氮去除率 /%
0	1~18	181.3±0.4	7.8±2.3	95.4±1.3	194.4±5.5	2.9±1.4	98.5±0.7	34.1±5.2	38.3±5.9	50.2±7.0	88.0±1.3
15	53~81	179.9±3.2	18.2±2.1	88.8±2.8	190.3±4.8	4.7±0.9	98.0±0.5	39.0±3.8	37.6±5.6	48.5±3.1	87.9±1.4
30	113~135	184.0±3.9	17.8±4.2	91.0±2.2	185.4±3.5	4.9±1.3	96.9±0.7	36.8±4.3	36.5±2.7	51.3±4.8	86.8±0.9

1) 由于合成废水采用工业级药品配制, 故进水中含有少量硝氮, 硝氮去除率 = [(进水硝氮 + 厌氧氨氧化生成硝氮) - 出水硝氮] / (进水硝氮 + 厌氧氨氧化生成硝氮) × 100%

第 1~18 d 为反应器 0 g·L⁻¹ 盐度下稳定运行阶段, 反应器氨氮、亚硝氮、硝氮平均去除率分别为 95.4%、98.5% 和 50.2%。第 19 d 将反应器进水盐度提升至 15 g·L⁻¹, 随后反应器去除性能下降, 主要表现为氨氮去除率的下降, 亚硝氮去除率略有波动但相对稳定。第 53 d 反应器的氨氮去除率恢复至 90% 以上, 认为反应器性能恢复。第 81 d 继续将反应器进水盐度提升至 30 g·L⁻¹, 氨氮和亚硝氮的去除率同样下降并以氨氮为主, 第 113 d 反应器的氨氮去除率恢复至 90% 以上, 反应器性能恢复。

第 53~81 d 为反应器 15 g·L⁻¹ 盐度下稳定运行阶段, 该阶段氨氮、亚硝氮及硝氮的平均去除率分别为 88.8%、98.0% 和 48.5%, 而第 113~135 d 为反应器 30 g·L⁻¹ 盐度下稳定运行阶段, 该阶段氨氮、亚硝氮及硝氮的平均去除率分别为 91.0%、

96.9% 和 51.3%。对比 3 个稳定阶段可知, 15 g·L⁻¹ 盐度和 30 g·L⁻¹ 盐度稳定运行阶段反应器的脱氮性能相当, 但都略低于 0 g·L⁻¹ 盐度。表明 ANAMMOX-EGSB 反应器可耐受不超过 30 g·L⁻¹ 的盐度条件维持脱氮性能稳定。

反应器进水氨氮和亚硝氮浓度按照 1:1 比例添加, 根据厌氧氨氧化计量关系式^[15]可知氨氮和亚硝氮的理论比例为 1:1.32, 因此进水氨氮浓度是过量的。假设反应器中仅发生厌氧氨氧化反应, 由亚硝氮浓度即可推算出理论总氮去除率大致介于 71.1%~74.0%, 明显低于表 1 中反应器的实际总氮去除率。因此除厌氧氨氧化外, 反应器还存在其它脱氮途径, 如进水中过量氨氮的去除, 厌氧氨氧化反应产生硝氮的反硝化等, 这涉及反应器中伴生菌的分析。

2.2 颗粒污泥表面形貌

不同盐度条件下反应器颗粒污泥表面形貌如图 3 所示. 从中可知, $0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐条件下, 颗粒污泥表面主要为大量球菌和少量丝状菌, 表面光滑. $15 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐度下, 污泥表面产生一些胞外聚合物, 丝

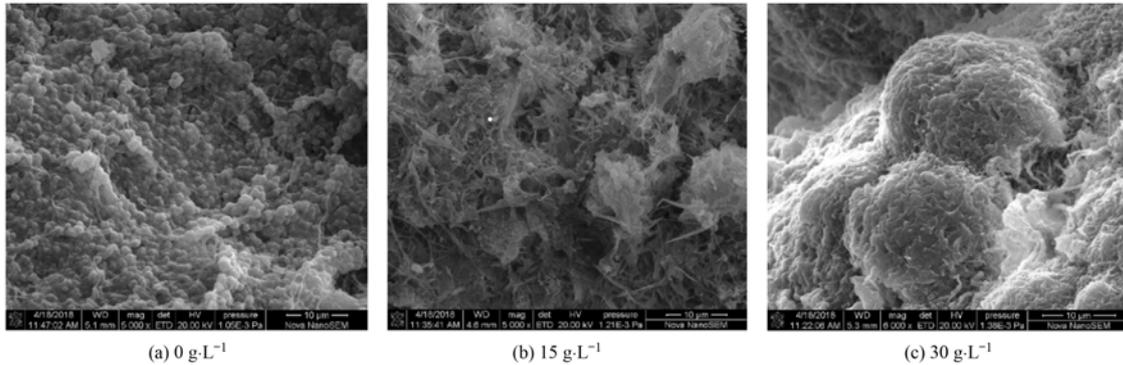


图 3 不同盐度下反应器颗粒污泥表面形貌

Fig. 3 Surface morphology of the granular sludge under different salinities

2.3 反应器微生物群落

2.3.1 门水平微生物群落结构

图 4 为不同盐度下反应器门水平微生物群落柱状图. 从中可知, 颗粒污泥中微生物按门水平丰度高低排序依次为浮霉状菌门(Planctomycetes)、绿弯菌门(Chloroflexi)、变形菌门(Proteobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、放线菌门(Actinobacteria)、绿菌门(Chlorobi).

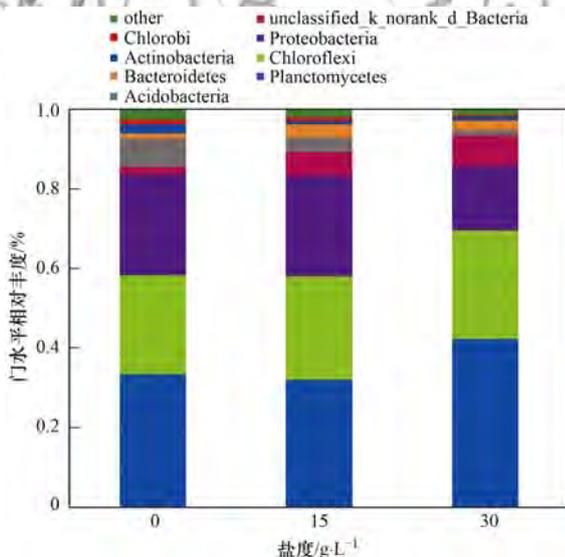


图 4 不同盐度下反应器门水平微生物群落柱状图

Fig. 4 Bar chart of the microbial community at the phylum level under different salinities

有报道表明, 尽管反应器进水成分存在差异, 但在不同的厌氧氨氧化废水处理系统中, 除浮霉状菌门外, 变形菌门、绿弯菌门、绿菌门、拟杆菌门常常被检测到且丰度较高^[17~19], 表明这些菌门与厌氧氨氧化菌存在密切的关系. 浮霉状菌门、变形

状菌数量增多, 粗糙度增加. $30 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐度下, 污泥表面产生大量的胞外聚合物, 出现球状凸起, 丝状菌被胞外聚合物紧密包裹. 可见盐度条件下胞外聚合分泌增加, 该结果与王子超等^[16]发现盐度导致厌氧颗粒污泥胞外聚合物增加的结论一致.

菌门、绿弯菌门丰度占总体比例较高且累计丰度超过了 80%, 为反应器的优势菌门.

厌氧氨氧化菌属于浮霉状菌门, 反应器中该菌门丰度在盐度条件有所增加, 表明厌氧氨氧化菌可以较好地耐受盐度, 为反应器脱氮性能的稳定提供了支撑. 变形菌门是细菌域中菌属最多多样化的菌门, 该菌门微生物具有多样的代谢机制、营养类型及形态特征, 包括具备氮素转化功能的氨氧化细菌、亚硝酸盐氧化菌和反硝化菌^[20], 该菌门丰度在盐度条件下降低, 可能与所属细菌耐盐能力不同有关. 绿弯菌门细菌可降解溶解性有机物、胞外聚合物以及衰亡细菌残体^[21], 并具有稳定颗粒污泥结构的作用^[22], 该菌门丰度在盐度条件下相对稳定.

拟杆菌门细菌功能广泛, 具备有机物质降解、反硝化、固氮等功能, 对维持颗粒污泥形态也有一定作用^[22], 该菌门丰度在盐度条件下有所增加. 酸杆菌门细菌也具备降解复杂高分子有机物如木聚糖, 半纤维素, 果胶和几丁质等的的能力^[23], 该菌门丰度在盐度条件下降低. 绿菌门多为光合自养微生物^[24], 其丰度在盐度条件下降低.

2.3.2 属水平微生物群落结构

图 5 为不同盐度下反应器属水平微生物群落 Heatmap 图(分类水平总丰度前 20 的物种), 其中标注了不同属所对应的菌门.

如图 5 所示, 颗粒污泥在属水平中检测到了归属于浮霉状菌门的 *Candidatus Jettenia*、unclassified *Brocadiaceae*、*Candidatus Kuenenia* 厌氧氨氧化菌属, 上述 3 属的丰度在盐度条件下均增加, 3 属累计丰度在不含盐条件下为 10.33%, $15 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $30 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐度分别为 20.90% 和 35.87%, 其中

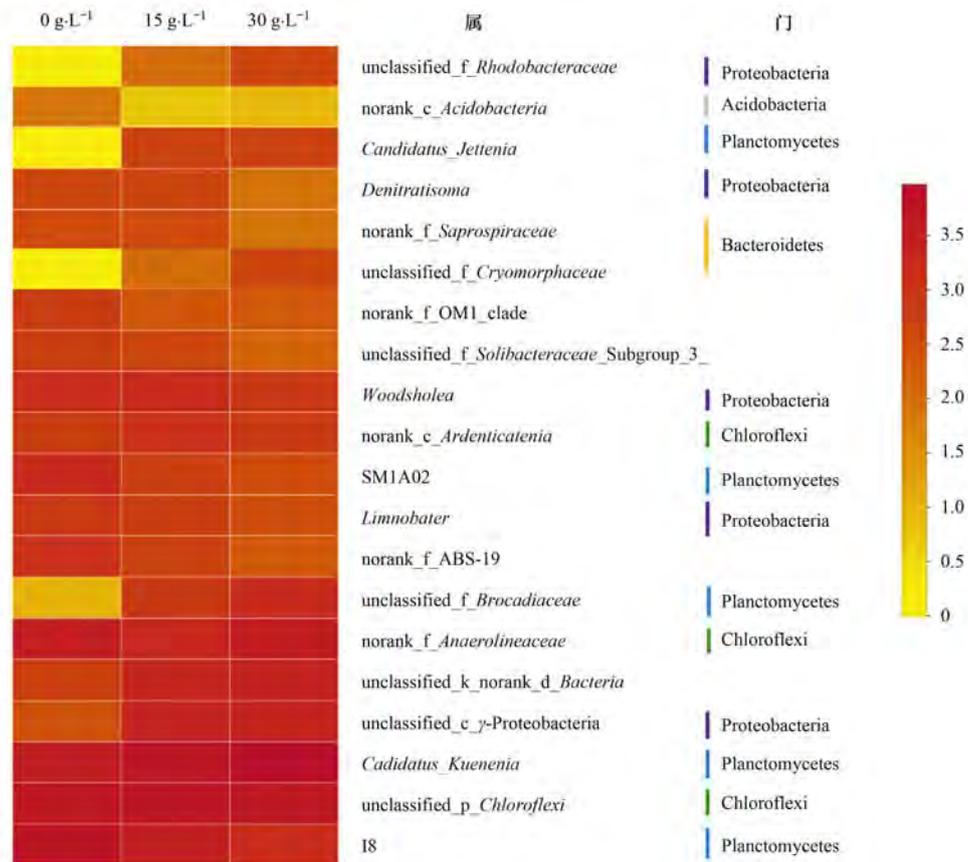


图 5 不同盐度下反应器属水平微生物群落 Heatmap 图

Fig. 5 Heatmap of the microbial community at the genus level under different salinities

Candidatus Kuenenia 丰度较高。由于厌氧氨氧化菌存在种属间的竞争关系，故在一个废水处理系统中常以某一种属丰度占据优势^[25, 26]。*Candidatus Kuenenia* 对亚硝酸盐的亲中性优于其它厌氧氨氧化菌属^[27]，可能是丰度占优的原因。*Candidatus Kuenenia* 在盐度条件下仍可维持较高丰度，也与 Yang 等^[10] 报道 30 g·L⁻¹ 盐度条件下 *Candidatus Kuenenia* 为优势属的结论一致。

除厌氧氨氧化菌外，颗粒污泥在浮霉状菌门还检测到了 SM1A02 属和 I8 属，它们常在厌氧氨氧化系统中被检测到^[28, 29]，但功能不明且报道较少。不含盐条件下二者丰度分别为 5.1% 和 17.7%，盐度条件下处于 1.1% ~ 1.9% 和 4.8% ~ 9.0% 范围，均明显下降。

变形菌门在属水平检测到了反硝化菌，主要包括 *Rhodobacteraceae*、*Myxococcales*、*Denitratisoma*，累计丰度在不含盐条件下为 1.61%，盐度条件下依次增加至 2.88% 和 3.13%。有报道指出它们均具有一定的耐盐能力^[30, 31]，其丰度的提高表明盐度条件下反硝化活动的增强。此外，在变形菌门中还检测到了 *Nitrosomonadaceae* 好氧氨氧化菌，其丰度在不含盐条件下为 1.11%，盐度条件下介于 0.235%

~0.511% 范围。该属被检出表明系统具有一定的好氧氨氧化能力。Sabumon 等^[32] 曾指出在厌氧氨氧化系统中较低的 ORP 电位 [(-248 + 25) mV] 下氨氮也可被氧化成硝氮，也表明反应器存在少量的好氧氨氧化细菌。*Nitrosomonadaceae* 丰度的降低一方面表明含盐条件下氨氮氧化的能力降低，另一方面表明含盐条件下反应器内厌氧水平良好。

变形菌门还存在一些其它功能的微生物，如 γ -Proteobacteria、*Limnobacter*、*Woodsholea* 等属。 γ -Proteobacteria 属为主要分布于海洋环境中的自养微生物，可在厌氧环境下进行生物固氮^[33]，其丰度由不含盐条件下的 0.895% 增加至含盐条件下的 7% 以上。*Limnobacter* 为甲烷依赖型异养微生物^[34]，其丰度由不含盐条件下的 2.58% 降低至盐度条件的 0.5% 以下。*Woodsholea* 是常见于海洋或盐碱地中的自养好氧微生物，可被低浓度有机物抑制^[35]，丰度由不含盐条件下的 3.74% 降低至含盐条件的 2.6% 以下。

绿弯菌门在属水平主要包括 *Anaerolineaceae*、unclassified *Chloroflexi* 和 *Ardenticatenia*。*Anaerolineaceae* 具有降解微生物残体的功能^[36]，该属丰度在不含盐条件下为 9.39%，在含盐条件下处

于 5.29% ~ 9.38% 范围. unclassified *Chloroflexi* 和厌氧氨氧化菌关系密切, Kindaichi 等^[21]通过实验证明 unclassified *Chloroflexi* 可分解厌氧氨氧化菌衰老残体并产生有机物, 该属丰度在不含盐条件下为 12.42%, 盐度条件下处于 14.93% ~ 16.85% 范围. *Ardenticatenia* 具有还原三价铁和硝酸盐的能力^[37], 其丰度在不含盐条件下为 2.06%, 盐度条件下处于 2.57% ~ 3.48% 范围.

拟杆菌门在属水平也检测到了反硝化菌, 主要为 *Saprospiraceae* 和 *Cryomorphaceae*. 拟杆菌门所含反硝化菌丰度不含盐条件下为 1.11%, 含盐条件下依次为 1.16% 和 1.18%, 虽然丰度变化不大, 但出现了主要菌属的演替, 由 *Saprospiraceae* 转变为了 *Cryomorphaceae*, *Cryomorphaceae* 为丝状反硝化菌^[38], 具有较好的耐盐能力.

3 讨论

盐度条件下厌氧氨氧化菌丰度的增加体现了其对盐度的适应, 但丰度的提高可能主要与运行时间的延长有关. 如有文献报道^[22], 在 2.67 ~ 3.62 $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的负荷条件下厌氧氨氧化菌的丰度随着运行时间的延长, 呈现出 1 ~ 3 倍的增加.

颗粒污泥中, 变形菌门、拟杆菌门、绿弯菌门均检测到了反硝化菌, 其累计丰度由不含盐条件下的 4.88% 增加至盐度条件下的 6.62% 和 7.79%, 可见盐度条件下反硝化协同脱氮途径是增强的. 反应器中污泥的溶解性微生物产物 (SMP) 是有机物的主要来源, 有报道指出盐度会导致污泥中部分微生物细胞死亡或胞内物质溶出^[39,40], 因此可导致 SMP 含量增加, 进而使有机物浓度增加. 一方面有机物的存在为反硝化脱氮提供了碳源, 支撑协同反硝化脱氮, 但另一方面也有可能对厌氧氨氧化菌产生抑制作用. Molinuevo 等^[41]认为有机物的存在会引起异养菌的大量繁殖, 与厌氧氨氧化菌竞争电子受体亚硝酸盐形成抑制, 当 COD 浓度为 290 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时即可完全抑制厌氧氨氧化. 本研究中盐度条件下反硝化菌丰度的提高, 有利于转化厌氧氨氧化反应产生的硝氮, 提高了反应器的脱氮效率, 也在一定程度上解除了有机物可能导致的抑制. 该结果也支撑了图 2 和表 1 中盐度条件下反应器较好的脱氮性能.

颗粒污泥是富集厌氧氨氧化菌的有效方式, 其结构的稳定对厌氧氨氧化活性的发挥具有重要作用. 有报道表明绿弯菌门和拟杆菌门与颗粒污泥关系密切^[22], Björnsson 等^[42]的研究表明绿弯菌门细菌在厌氧氨氧化污泥中起到了支撑和骨架作用, 其

中所包含的大量丝状菌在颗粒污泥造粒过程中起着重要的作用. 本研究中绿弯菌门细菌的丰度在含盐条件下处于 26.0% ~ 27.3% 范围, 略高于不含盐条件下 24.9% 的丰度. 如图 3 所示, 盐度条件下颗粒污泥表面有大量丝状菌, 可能与绿弯菌门增加有关. 盐度条件下绿弯菌门丰度的相对稳定表明其对颗粒污泥结构稳定发挥了支撑作用. Fernández-Gomez 等^[43]的研究表明, 拟杆菌门细菌可分泌大量的胞外多糖, 具有较强的附着能力, 生长于颗粒表面. Cao 等^[22]的研究也认为该菌门细菌倾向于在颗粒污泥的外层附着生长, 可形成网状结构支撑颗粒的形成. 本研究中该菌门的丰度在含盐条件下处于 2.4% ~ 3.3% 范围, 高于不含盐条件下的 1.22%. 由图 3 也可知, 盐度条件下颗粒污泥表面胞外聚合物分泌明显增多, 30 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐度下甚至形成了球状凸起, 推测拟杆菌门丰度的增加支撑了盐度条件下胞外聚合物的分泌的增加. 因此, 盐度条件下绿弯菌门和拟杆菌门丰度的提高有利于维持颗粒污泥结构的稳定.

厌氧氨氧化菌为严格厌氧微生物, 由于实际废水处理过程中不可避免存在的少量溶解氧, 将影响厌氧氨氧化菌活性. Jettnia 等曾报道^[44], 当水中溶解氧大于 0.032 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 即会抑制其活性, 而伴生菌中所含好氧菌及兼性菌可消耗溶液中的溶解氧保证厌氧氨氧化菌的活性. 颗粒污泥中检测到的好氧微生物主要为 *Nitrosomonadaceae* 和 *Woodsholea*, 它们的累计丰度由不含盐条件下的 4.84% 降低至盐度下的 2.8% ~ 3.0% 范围, 由此推测盐度条件下反应器内部厌氧水平有所提高. 另外, 反硝化菌在好氧和厌氧条件下都可生存, 故也可消耗微量溶解氧, 盐度条件下反硝化菌丰度的增加, 也有利于维持反应器良好的厌氧条件.

盐度条件下不同伴生菌门优势属的转变反映了微生物对盐度的适应性, 含盐条件下厌氧氨氧化反应器运行稳定时, 这些菌门的优势属在厌氧氨氧化污泥中也常被检测到. 如 Yokota 等^[45]报道 UASB 厌氧氨氧化反应器在处理不含盐废水时变形菌门以 α -Proteobacteria 和 β -Proteobacteria 为主, 而处理含盐废水时却转变为以 γ -Proteobacteria 为主. Gonzalez-Silva 等^[11]也观察到了拟杆菌门丰度在高盐度条件下丰度增加, 并以 *Cryomorphaceae* 和 *Flavobacteriia* 为主, 绿弯菌门主要以 *Anaerolineaceae* 为主, 这些结果也与本研究结果一致. 可见盐度条件下厌氧氨氧化反应器稳定运行时, 伴生菌门所含优势属具有种群相似性. 因此处理实际含盐废水时, 选择盐度驯化后且优势菌种群相似的富集培养

物作为接种污泥将有利于反应器启动及后续运行。

颗粒态厌氧氨氧化污泥相比于絮状污泥能更好地维持厌氧微区,有利于伴生菌中的反硝化菌发挥协同脱氮,有利于绿弯菌门和拟杆菌门等起支撑作用的伴生菌稳定污泥结构,也有利于好氧和兼性伴生细菌消耗微量溶解氧。Yokota 等^[45]的研究也表明以颗粒态污泥为接种污泥的 UASB 厌氧氨氧化反应器处理含盐高氨氮废水时,厌氧氨氧化菌丰度快速增加且获得了很高的氮去除负荷,而非颗粒态污泥为接种污泥时仅在内壁发现红色培养物生长且氮去除负荷极低,因此颗粒态污泥不仅有利于厌氧氨氧化菌的富集,也有利于伴生菌与厌氧氨氧化菌协同发挥作用。

4 结论

(1) ANAMMOX-EGSB 反应器在两次盐度提升后脱氮性能均下降,随着运行时间的延长又可恢复,氨氮、亚硝氮平均去除率可分别在 88.8% ~ 95.4%、96.9% ~ 98.5% 范围内维持稳定,而且反应器内存在明显的反硝化协同脱氮。厌氧氨氧化菌可适应 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐度,其丰度在盐度条件下随运行时间延长而增加。*Candidatus Kuenenia* 为厌氧氨氧化菌的优势属。盐度条件下颗粒污泥表面有大量丝状菌和胞外聚合物。

(2) 盐度条件下反硝化菌属丰度提高,增强了反硝化协同脱氮,也避免了有机物对厌氧氨氧化的抑制。绿弯菌门和拟杆菌门丰度的提高有利于维持颗粒污泥结构的稳定。盐度条件下好氧微生物和反硝化菌存在也有利于维持反应器内部厌氧水平。因此,盐度条件下伴生菌对厌氧氨氧化菌功能的发挥提供了支撑。

参考文献:

- [1] 汪瑶琪,张敏,姜滢,等. 厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5184-5191.
Wang Y Q, Zhang M, Jiang Y, et al. Start-up and characteristics of the microbial community structure of ANAMMOX[J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5184-5191.
- [2] Costa M C M S, Carvalho L, Leal C D, et al. Impact of inocula and operating conditions on the microbial community structure of two anammox reactors[J]. Environmental Technology, 2014, **35**(14): 1811-1822.
- [3] 曹雁,王桐屿,秦玉洁,等. 厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1544-1550.
Cao Y, Wang T Y, Qin Y J, et al. Nitrogen removal characteristics and diversity of microbial community in ANAMMOX reactor[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1544-1550.
- [4] 陈重军,张海芹,汪瑶琪,等. 基于高通量测序的 ABR 厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2652-2658.
Chen C J, Zhang H Q, Wang Y Q, et al. Characteristics of microbial community in each compartment of ABR ANAMMOX reactor based on high-throughput sequencing[J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2652-2658.
- [5] Pereira A D, Leal C D, Dias M F, et al. Effect of phenol on the nitrogen removal performance and microbial community structure and composition of an anammox reactor [J]. Bioresource Technology, 2014, **166**: 103-111.
- [6] Isanta E, Bezerra T, Fernández I, et al. Microbial community shifts on an anammox reactor after a temperature shock using 454-pyrosequencing analysis [J]. Bioresource Technology, 2015, **181**: 207-213.
- [7] Leal C D, Pereira A D, Nunes F T, et al. Anammox for nitrogen removal from anaerobically pre-treated municipal wastewater: effect of COD/N ratios on process performance and bacterial community structure [J]. Bioresource Technology, 2016, **211**: 257-266.
- [8] Yang W, He S L, Han M, et al. Nitrogen removal performance and microbial community structure in the start-up and substrate inhibition stages of an anammox reactor [J]. Journal of bioscience and bioengineering, 2018, **126**(1): 88-95, doi: 10.1016/j.jbiosc.2018.02.004.
- [9] Kartal B, Koleva M, Arsov R, et al. Adaptation of a freshwater anammox population to high salinity wastewater [J]. Journal of Biotechnology, 2006, **126**(4): 546-553.
- [10] Yang J C, Zhang L, Hira D, et al. Anammox treatment of high-salinity wastewater at ambient temperature [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 2367-2372.
- [11] Gonzalez-Silva B M, Rønning A J, Andreassen I K, et al. Changes in the microbial community of an anammox consortium during adaptation to marine conditions revealed by 454 pyrosequencing [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2017, **101**(12): 5149-5162.
- [12] Wei Q Y, Kawagoshi Y, Huang X W, et al. Nitrogen removal properties in a continuous marine anammox bacteria reactor under rapid and extensive salinity changes [J]. Chemosphere, 2016, **148**: 444-451.
- [13] Van De Graaf A A, De Bruijn P, Robertson L A, et al. Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor [J]. Microbiology, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [15] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, et al. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1998, **50**(5): 589-596.
- [16] 王子超,高孟春,魏俊峰,等. 盐度变化对厌氧污泥胞外聚合物的影响[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(9): 3273-3281.
Wang Z C, Gao M C, Wei J F, et al. Effect of salinity on extracellular polymeric substances of anaerobic sludge [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(9): 3273-3281.
- [17] Li X R, Du B, Fu H X, et al. The bacterial diversity in an anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) reactor community [J]. Systematic and Applied Microbiology, 2009, **32**(4): 278-289.
- [18] Park H, Rosenthal A, Ramalingam K, et al. Linking community profiles, gene expression and N-removal in anammox bioreactors treating municipal anaerobic digestion reject water [J].

- Environmental Science & Technology, 2010, **44** (16): 6110-6116.
- [19] Cho S, Takahashi Y, Fujii N, *et al.* Nitrogen removal performance and microbial community analysis of an anaerobic up-flow granular bed anammox reactor[J]. Chemosphere, 2010, **78**(9): 1129-1135.
- [20] Garrity G, Brenner D J, Krieg N R, *et al.* Bergey's manual® of systematic bacteriology: Volume 2: the proteobacteria [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 735-769.
- [21] Kindaichi T, Yuri S, Ozaki N, *et al.* Ecophysiological role and function of uncultured *Chloroflexi* in an anammox reactor [J]. Water Science & Technology, 2012, **66**(12): 2556-2561.
- [22] Cao S B, Du R, Li B K, *et al.* High-throughput profiling of microbial community structures in an ANAMMOX-UASB reactor treating high-strength wastewater[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, **100**(14): 6457-6467.
- [23] Ward N L, Challacombe J F, Janssen P H, *et al.* Three genomes from the phylum *Acidobacteria* provide insight into the lifestyles of these microorganisms in soils [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2009, **75** (7): 2046-2056.
- [24] Bryant D A, Frigaard N U. Prokaryotic photosynthesis and phototrophy illuminated[J]. Trends in microbiology, 2006, **14** (11): 488-496.
- [25] Kartal B, Rattray J, Van Niftrik L A, *et al.* *Candidatus "Anammoxoglobus propionicus"* a new propionate oxidizing species of anaerobic ammonium oxidizing bacteria[J]. Systematic and Applied Microbiology, 2007, **30**(1): 39-49.
- [26] Hu B L, Zheng P, Tang C J, *et al.* Identification and quantification of anammox bacteria in eight nitrogen removal reactors[J]. Water Research, 2010, **44**(17): 5014-5020.
- [27] Sun W J, Banihani Q, Sierra-Alvarez R, *et al.* Stoichiometric and molecular evidence for the enrichment of anaerobic ammonium oxidizing bacteria from wastewater treatment plant sludge samples[J]. Chemosphere, 2011, **84**(9): 1262-1269.
- [28] Ding S Z, Bao P, Wang B, *et al.* Long-term stable simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process treating real domestic sewage using suspended activated sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, **339**: 180-188.
- [29] Liu W R, Yang D H, Chen W J, *et al.* High-throughput sequencing-based microbial characterization of size fractionated biomass in an anoxic anammox reactor for low-strength wastewater at low temperatures [J]. Bioresource Technology, 2017, **231**: 45-52.
- [30] Pujalte M J, Lucena T, Ruvira M A, *et al.* The family Rhodobacteraceae[A]. In: Rosenberg E, DeLong E F, Lory S, *et al.* (Eds.). The Prokaryotes: Alphaproteobacteria and Betaproteobacteria. Berlin: Springer, 2014. 439-512.
- [31] Iizuka T, Jojima Y, Fudou R, *et al.* Isolation of myxobacteria from the marine environment [J]. FEMS Microbiology Letters, 1998, **169**(2): 317-322.
- [32] Sabumon P C. Anaerobic ammonia removal in presence of organic matter; a novel route[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **149**(1): 49-59.
- [33] Riemann L, Farnelid H, Steward G F. Nitrogenase genes in non-cyanobacterial plankton; prevalence, diversity and regulation in marine waters[J]. Aquatic Microbial Ecology, 2010, **61** (3): 235-247.
- [34] Spring S, Kämpfer P, Schleifer K H. *Limnobacter thiooxidans* gen. nov., sp. nov., a novel thiosulfate-oxidizing bacterium isolated from freshwater lake sediment [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2001, **51** (4): 1463-1470.
- [35] Abraham W R, Strömpl C, Vancanneyt M, *et al.* *Woodsholea maritima* gen. nov., sp. nov., a marine bacterium with a low diversity of polar lipids [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2004, **54**(4): 1227-1234.
- [36] Nelson M C, Morrison M, Yu Z T. A meta-analysis of the microbial diversity observed in anaerobic digesters [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(4): 3730-3739.
- [37] Kawaiichi S, Ito N, Kamikawa R, *et al.* *Ardenticatena maritima* gen. nov., sp. nov., a ferric iron- and nitrate-reducing bacterium of the phylum 'Chloroflexi' isolated from an iron-rich coastal hydrothermal field, and description of *Ardenticatena* classis nov [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2013, **63** (8): 2992-3002.
- [38] Bowman J P. The family cryomorphaceae [M]. In: Rosenberg E, DeLong E F, Lory S, *et al.* (Eds.). Berlin: Springer, 2014. 539-550.
- [39] Windey K, De Bo I, Verstraete W. Oxygen-limited autotrophic nitrification - denitrification (OLAND) in a rotating biological contactor treating high-salinity wastewater [J]. Water Research, 2005, **39**(18): 4512-4520.
- [40] Dinçer A R, Kargı F. Performance of rotating biological disc system treating saline wastewater [J]. Process Biochemistry, 2001, **36**(8-9): 901-906.
- [41] Molinuevo B, García M C, Karakashev D, *et al.* Anammox for ammonia removal from pig manure effluents; effect of organic matter content on process performance [J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(7): 2171-2175.
- [42] Björnsson L, Hugenholtz P, Tyson G W, *et al.* *Filamentous Chloroflexi* (green non-sulfur bacteria) are abundant in wastewater treatment processes with biological nutrient removal [J]. Microbiology, 2002, **148**(8): 2309-2318.
- [43] Fernández-Gómez B, Richter M, Schüller M, *et al.* Ecology of marine Bacteroidetes: a comparative genomics approach [J]. The ISME Journal, 2013, **7**(5): 1026-1037.
- [44] Jetten M, Schmid M, Van De Pas - Schoonen K, *et al.* Anammox organisms: enrichment, cultivation, and environmental analysis [J]. Methods in Enzymology, 2005, **397**: 34-57.
- [45] Yokota N, Watanabe Y, Tokutomi T, *et al.* High-rate nitrogen removal from waste brine by marine anammox bacteria in a pilot-scale UASB reactor [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018, **102**(3): 1501-1512.

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yun-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)